

南極周回気球 (PPB) 将来計画 1991-1993

藤井良一¹・宮岡 宏¹・門倉 昭¹・小野高幸¹・山岸久雄¹・
佐藤夏雄¹・江尻全機¹・平澤威男¹・西村 純²・矢島信之²・
山上隆正²・太田茂男²・秋山弘光²・鶴田浩一郎²・小玉正弘³・
福西 浩⁴・山中大学⁵・國分 征⁶

Polar Patrol Balloon Experiment During 1991-1993

Ryoichi FUJII¹, Hiroshi MIYAOKA¹, Akira KADOKURA¹, Takayuki ONO¹, Hisao YAMAGISHI¹,
Natsuo SATO¹, Masaki EJIRI¹, Takeo HIRASAWA¹, Jun NISHIMURA², Nobuyuki YAZIMA,²
Takamasa YAMAGAMI², Shigeo OHTA², Hiromitsu AKIYAMA², Koichiro TSURUDA²,
Masahiro KODAMA³, Hiroshi FUKUNISHI⁴, Manabu D. YAMANAKA⁵,
and Susumu KOKUBUN⁶

Abstract: Since 1984 the National Institute of Polar Research, the Institute of Space and Astronautical Science and collaborative scientists have conducted the long-term circumpolar balloon program that is called Polar Patrol Balloon (PPB) project, and they also have developed ballooning technologies for this program. This project aims at establishing a station network in the stratosphere over the Antarctic region for geophysical and astrophysical observations. Two test flight experiments that were performed by the 28th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) in 1987 have convinced us that PPB would come back to the launching area with a good possibility. During 1991 and 1993 (JARE-32-34) at Syowa Station, the PPB experiments will consequently be done for scientific researches. This brief paper reports unique advantages of PPB, specifications and expected trajectories of PPB, and planned scientific researches with PPB.

要旨: 南極周回気球 (Polar Patrol Balloon: PPB) 計画は、気球を成層圏内に一定高度で長時間 (数週間) 浮遊させ、安定した zonal な風系に乗せて南極大陸の回りを周回させ地球物理や宇宙線・天文等の観測を行うことを目的としている。宇宙科学研究所によりその実現可能性が検討され、国立極地研究所に提案された観測計画で、昭和 59 年度より国立極地研究所、宇宙科学研究所、全国の共同研究者が共同して、PPB の開発を行ってきた。PPB 実験を行うための工学的開発は順調に進み、この間第 28 次観測隊での 2 機の飛しょう試験も実施した。本報告では現在までに開発した工学的技術や予想される PPB の季節・高度別飛しょう軌道、PPB 実験のスケジュール及び搭載の考えられている観測機器について概略を述べる。

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

² 宇宙科学研究所. Institute of Space and Aeronautical Science, 1-1, Yunodai, 3-chome, Sagamihara 229.

³ 山梨医科大学. Yamanashi Medical College, Tamaho, Nakakoma, Yamanashi 409-38.

⁴ 東北大学理学部. Upper Atmosphere and Space Research Laboratory, Tohoku University, Sendai 980.

⁵ 京都大学. Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University, Gokasho, Uji 611.

⁶ 東京大学理学部. Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

1. 序

南極周回気球 (Polar Patrol Balloon; PPB) 実験は, 南極の夏季に日没がないことを利用してゼロプレッシャー気球を用い, ほぼ安定して zonal (西向き) な南極大陸高層の夏季風系にのせて, 気球を数週間で南極大陸のまわりを周回させ(図1), 超高層物理や気象等の地球物理の観測及び天文の観測を行うことを目的としている (NISHIMURA *et al.*, 1985; NAGATA *et al.*, 1985). この極域における PPB 実験は国境のない南極でなければできない実験であり広い分野の研究者から期待を集めつつある.

気球による長時間観測実験については, 現在までスーパープレッシャー気球, ゼロプレッシャー気球を使用して行うことが検討されてきた. スーパープレッシャー気球については, GHOST 計画 (1969) をはじめとして実験が行われてきた. しかし, スーパープレッシャー

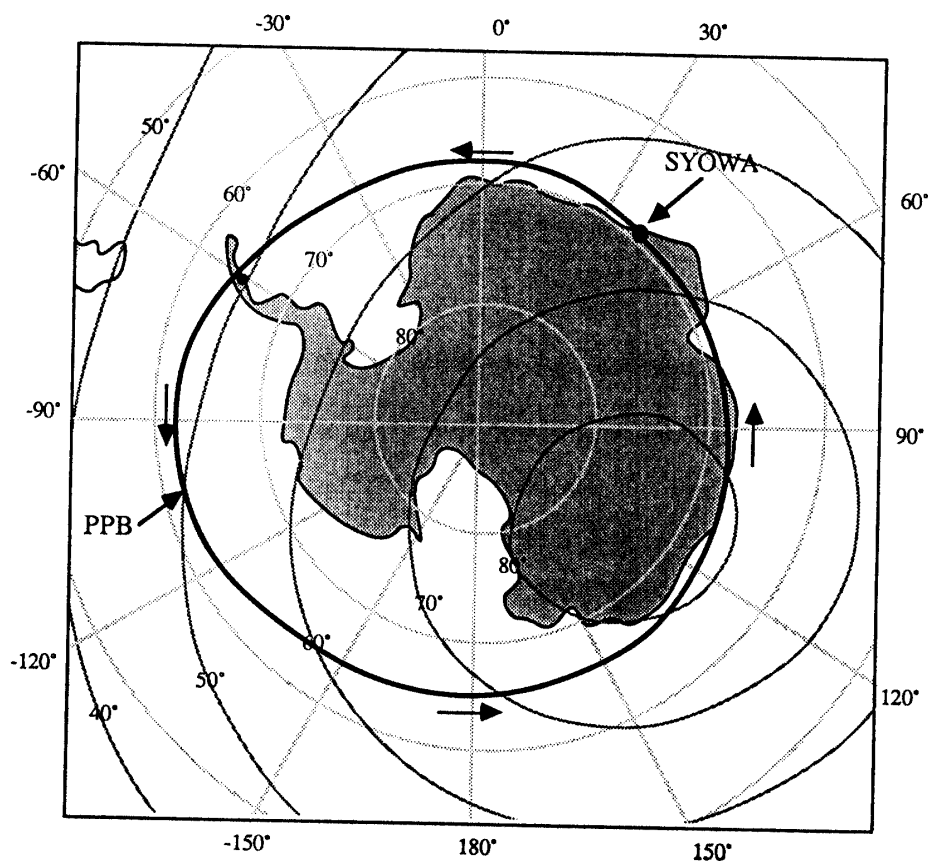


図1 南極大陸とPPBの軌跡予想図. 図中の座標は細線が地理座標, 太線が地磁気座標を表す. 昭和基地から放球されたPPBは, 安定した西向きの風により南極大陸の回りを周回し, 昭和基地に回帰してくる. PPB上のデータレコーダーで記録されたデータは, 昭和基地及び南極半島の外国基地でも再生記録される.

Fig. 1. An expected trajectory of PPB over Antarctica in the geographic coordinates of latitudes and longitudes (thin lines) and in the geomagnetic coordinates of invariant latitudes (thick circles). A PPB launched from Syowa Station would come back along with a stable zonal westerly wind. Data recorded on board PPB will be down-linked at Syowa Station and a station on the Antarctic Peninsula.

気球は技術的に大型化することが難しく、軽量の機器しか搭載できないという問題点がある。またゼロプレッシャー気球については、日没のある期間、長時間飛しょうさせ周回させるためには、多量の高度保持用バラストを搭載しなければならないため実現されていない。そこで宇宙科学研究所において、夏季の極域では日没がない点に注目し、高層大気の輻射環境や風系を考慮して、この期間におけるゼロプレッシャー気球による **PPB** 実験の実現可能性が検討され、国立極地研究所に提案された。

この計画のため、1984年より国立極地研究所の宙空専門委員会内に **PPB** ワーキンググループが設置され、国立極地研究所、宇宙科学研究所及び大学機関の研究者が協力し、**PPB** 実験に必要な輻射環境や成層圏風系等の気象学的研究、及び機器・設備の開発が行われてきている。すでに1987年に第28次観測隊により、昭和基地において **PPB** 実験の最も基本的かつ重要な情報である上空での輻射環境を調べ、基本機器の性能をチェックするためのテストフライトが2回実施され、第30次観測隊でも1989年暮れに周回をめざしさらに実験が行われる予定である。

1991年（第32次観測隊）から3年計画で、これらの **PPB** の工学的実験の成果を踏まえ、昭和基地において実際に科学観測機器を搭載して、**PPB** 実験を本格的に開始する。そのためのどのような観測機器が **PPB** 実験に最適であるか、またどういう観測機器の組み合わせにするかを現在検討中である。

2. 気象学からみた **PPB** 実験の可能性

PPB の実現性については、NISHIMURA *et al.* (1985), NAGATA *et al.* (1985), YAMANAKA *et al.* (1988) に詳しく報告されている。YAMANAKA *et al.* (1988) は高層気象観測や気象ロケットのデータを用いて、平均南北風、大規模変動(地球を取り巻く波動による風系のうねり)、小規模変動(局所的な波動による流れの乱れ)及び微細乱流(風の‘息’)の効果を各々評価し、**PPB** が南極大陸を周回する可能性を論じた。図2と表1に YAMANAKA *et al.* (1988) で示された季節と高度による **PPB** 飛跡のシュミレーション結果を示す。周回の条件の良いのは12月、1月(南半球夏季)で高度は30-40 km である。放球点回帰時に予測される昭和基地からの緯度的変位は、例えば

1月 30 km 高度 40-700 km

1月 40 km 高度 40-100 km

であり、昭和基地で周回してきた **PPB** からのデータを受けられる可能性は極めて高い。回帰日数は時期及び高度により異なるが、高度が高くなれば回帰日数は短くなり、12月より1月の方が、少し回帰日数は長くなる。ちなみに12月の高度30 km では ~23日、40 km では ~11日となっている。また、冬期間も周回するが、回帰日数は数日と短い。

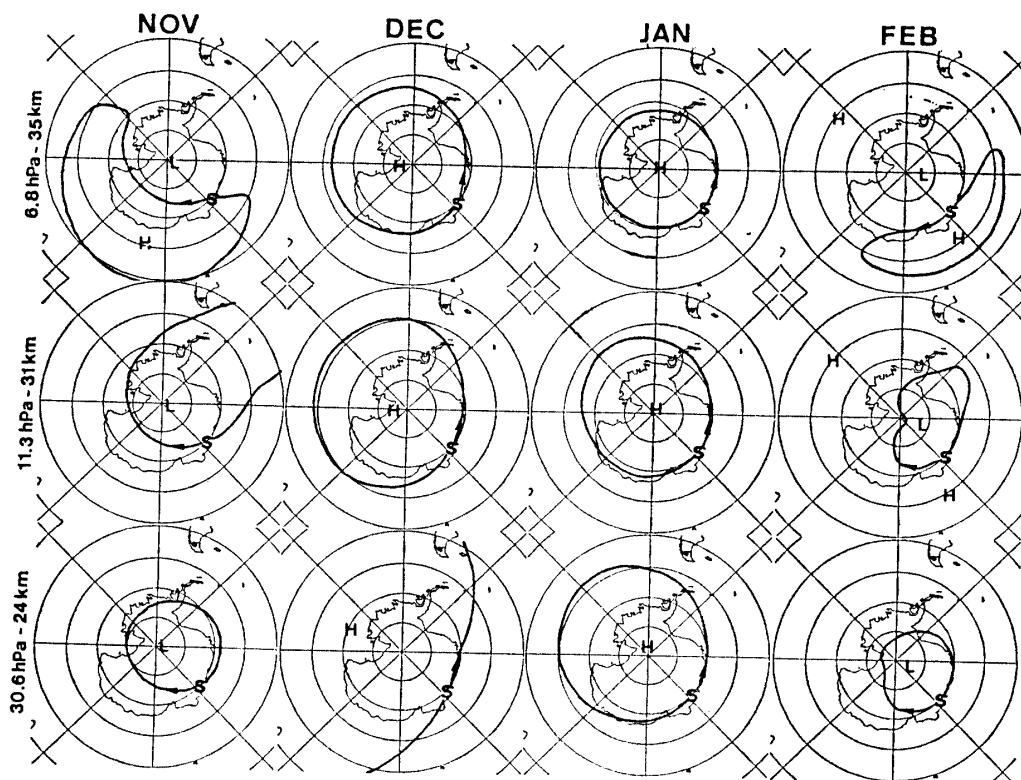


図 2 BARNETT and CORNEY (1985a, b) に基づき計算された月別、高度別の風系の流線。PPB の周回に適するのは11月から1月の高度 30 km 以上であることが分かる。YAMANAKA *et al.* (1988) より引用。

Fig. 2. Monthly-mean height dependent streamlines calculated based on BARNETT and CORNEY (1985a, b) after YAMANAKA *et al.* (1988).

表 1 KOSHELKOV (1985) に基づき計算された、月別の PPB の緯度 70° 円周を一周するのに要する周回日数 (YAMANAKA *et al.* (1988) による)。数字の付号は、正は東向き、負は西向きに気球が回ることを意味する

Table 1. Mean flight time (days) for the 70°S circumference (about 13750 km) calculated based on KOSHELKOV (1985) after YAMANAKA *et al.* (1988).

高 度	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
40 km	3	2	2	4	-53	-10	-12	-159	7	3	3	3
35 km	3	2	2	4	∞	-12	-18	∞	8	4	3	3
30 km	3	2	2	3	32	-20	-27	159	10	5	4	3
25 km	4	3	3	4	16	-53	-53	53	13	6	4	4
20 km	5	4	4	6	12	∞	-159	40	8	9	7	5

3. PPB 観測の特徴・利点

PPB 観測の特徴は、1) 南極大陸を一周し、放球点近傍に回帰すること、及び 2) 従来の大気球実験に比べ飛躍的に長時間 (2-3 週間) の観測が行える二点である。この二つの利点は各々独立なものではなく、相互に関連し合っているが、以下にその特色について述べる。

a) 周 回 性

ほぼ等緯度線に沿い高度 30-40 km を 2-3 週間で一周する。そのため以下に述べるような利点を持つ。

(i) 移動観測点(群): (イ) 地上観測点を設置するのに困難な場所での観測が行える。(ロ) あらゆる local time をカバーし、広い緯度にわたる広域探査に利用できる。(ハ) 特に同時複数 PPB を利用すると、広域同時観測、空間時間変動の分離等行える。

(ii) 大量データ取得可能: 放球点に回帰してくるので、データレコーダーによる大量のデータ収録が可能になる。これは昭和基地だけでなく他の外国基地でも再生データをおろすことを考えればさらに安全性・データ量とも増加する。

(iii) 軌跡の与える情報: PPB は風系の流線に沿うので、PPB の位置情報自体が風系のダイナミクスの研究に使用できる。

b) 長時間観測性

周回に 2-3 週間かかることから必然的に長時間観測という利点を持つ。しかも、今回開発したオートバラストシステム等の工学システムは他の季節、高度の周回しない実験にも使用できるので、周回性と切り離して長時間性のみを生かした観測も可能である。

(i) 長時間変動をする物理量のモニター: 非常にゆっくりした物理量の変動(ex. 突然昇温前後のオゾンの輸送)のモニターに利用できる。この場合、複数個 PPB による同時観測はさらに有効となる。

(ii) 出現頻度の極めて低い物理量の観測: 例えば γ 線バースト(山上, 1988), 太陽中性子(西村, 1988)のように、過去通常の気球等で、観測しても出現頻度自体が極めて低いためうまく観測できない現象の観測に適している。特に、空間的に離れた複数個の PPB で同時に現象が同定されれば、確定することができる。

(iii) 回帰しない季節の実験でも後述のアルゴシステムを搭載することにより風系をモニターすることができる。ただし、この場合は地上基地にデータを下ろすことは困難なので位置情報等のデータ量はアルゴスの能力で制限を受ける。

これら a) 及び b) の利点は通常の気球観測では実現できないものであり、また人工衛星観測にも勝るとも劣らない。特に衛星観測の場合は計画立案から観測実施まで長年月かかるのに比べ PPB 観測の場合は数年ででき、タイムリーな観測ができる点、及び経費が衛星に比べ 1/100 程度であるのが大きな長所になっている。

4. PPB 実験に必要な技術開発状況

PPB 実験を行うために 1984 年以来開発されてきた様々な技術を以下に述べる。

a) 定高度保持オートバラスト装置

気圧計制御でバラストを投下し、気球高度を一定に保つ装置で(Fujii *et al.*, 1983), 長時

間浮遊させるために必須の技術である。宇宙科学研究所三陸実験場(太田, 1988), 南極昭和基地で試験され, 基本的には完成している。バラスト量は現在気球システム全重量の 1/3 をしめているが, どの程度の量が必要かは, 高度・季節等による風系分布及び輻射環境を考慮し, 今後検討を要する。

b) ソーラーパネル電源装置

PPB 用電源としては, 夏季南極域では太陽がほぼ常時出ていることを考えると, 太陽電池を主として使い, バックアップとして一次電池を使うのが適当と考えられる。第 28 次観測隊では 2 機のパルーンに各々 4 枚のソーラーパネルを搭載し実験を行ったが, 基本的には低温環境下における使用に問題はないと考えられる。

c) データレコーダーシステム

PPB は周回するのに 2-3 週間かかるので, アルゴスで送りきれないデータについてはデータレコーダーを搭載する必要がある。必要なデータ容量は, PI からの要請によるが, その他ダウンリンク可能なデータ量からの制約もある。安全なデータ確保のため外国基地でもダウンリンクを行うとすると約 50 Mbyte 程度と予想される。またデータレコーダーの再生を行うためには地上局にコマンドシステムが必要になる。現在までの様々な媒体の長短所が検討され(狛, 1984), 実際 10 Mbyte のカセットデータレコーダーが開発され, 昭和基地周辺の低温下で試験されている。また, 最近宇宙研では, 2 Gbyte 程度のレコーダーのフライトテストが行われている。どういうレコーダーが最適かについては, 今後の重要な課題である。

d) 位置決定アルゴスシステム

アルゴスシステムについては PPB の緯度・経度を求めるものであり, 大気球実験として確立された技術といえる(太田, 1988)。なお, 極域実験では平均して 1 時間に 1 回程度の位置決めが可能である。また, 高度は気圧計を用いる。

e) 打ち上げ方式

PI の希望する高度, PI 重量により今後 B-30 クラス以上の気球打ち上げが必要になると考えられる。第 30 次観測隊(1988 年 11 月出発)より立ち上げ方式のランチャー設備一式を持ち込み, 本年(1989 年)放球実験を行う。

5. 外国基地でのデータ取得

PPB 実験のデータ量からみてデータレコーダー収録が必須である。万一 PPB が昭和基地視野内に戻ってこない場合はせっかくのデータが失われることになるので, ほかの外国基地でデータレコーダー再生を行う必要がある。第 28 次観測隊の結果から 南極半島は確実に通過するので, そこの外国基地でデータ受信を行うことを計画している。

6. 可能性のある観測項目

現在まで数度の研究小集会を開催し PPB に適した観測について議論を重ねてきた。多方面からの提案があり、特に従来南極の気球観測では余り行われていない天文・物理・宇宙線関係の観測の提案も多数あった。今後南極観測に新しい分野を切り開く意味からも大いに期待される。PPB として考えられる観測は、次の3分野に大別される。

- a) オーロラ物理：オーロラ X 線 (イメージングを含む)、電場、磁場、ELF、VLF 電波。
- b) 気象・雪氷：微量気体成分 (オゾン、NO_x 等)、風系、温度、乱流、雪氷分布、氷厚。
- c) 天文・物理：宇宙 γ 線バースト、宇宙線中の同位元素、太陽 X 線、太陽中性子。

PPB 単独でなく、他の地上観測点や飛しょう体観測との同時観測及び複数 PPB による同時観測は極めて重要である。ただし、極地からの放球ということを考えると、国内で十分気球実験として確立したものでないと実際の実施は難しいと考えられる。

7. ま と め

1991 から実施予定の PPB 実験の概要を以下にまとめる。

- a) 実験期間：1991-1993

周回実験…11月-1月、長時間実験…時期を問わず。

- b) 観測期間：バルーンの高度、バラスト量による。

ex. 高度 30 km であれば、周回に～20日間

- c) 観測機器重量：要求高度・高度精度、気球の大きさによる(表2)。

ex. B-30, 30 km 高度…～200 kg 程度

B-50, 32 km 高度…～200 kg 程度

表 2 気球サイズと搭載できるペイロードの重量及び到達できる高度との関係。オートバラストシステムに使用されるバラスト量は気球も含めた全重量の 1/3 (括弧内は 1/4) として計算されている。「除バラスト」欄が電池を含めた観測器の重量になる

Table 2. Relationship among allowable total payload weight and height and size of balloon used.

到達高度 気球(自重)	30 km		32 km		35 km	
	含バラスト	除バラスト	含バラスト	除バラスト	含バラスト	除バラスト
B ₁₅ (80 kg)	175 kg	85 kg (110 kg)	110 kg	45 kg (60 kg)	40 kg	0 kg (10 kg)
B ₃₀ (120 kg)	450 kg	260 kg (305 kg)	260 kg	135 kg (165 kg)	110 kg	30 kg (50 kg)
B ₅₀ (160 kg)	550 kg	310 kg (370 kg)	450 kg	245 kg (295 kg)	240 kg	105 kg (140 kg)

バラスト量=1/3×(バルーン重量+ゴンドラ重量+バラスト重量)
() 内は 1/4×()

- d) 電力: 周回実験 (全日照) … ~20W/10 kg 程度 (太陽電池)
長時間実験 (部分日照) … リチウム電池量に依存
- e) 高度保持精度: ~0.5 km
- f) 位置決定: 緯度, 経度 … アルゴス (~10 km の精度), 高度 … 気圧計
- g) データサンプリング:
リアルタイム … <20 kbit/s
データレコーダー … <30 byte/s (データ再生時間: 5 時間として)
アルゴス … ~480 byte/h (32 byte/回 × 15 回/h)

8. 第 32 次観測隊実施計画

第 32 次夏期間 (1991 年 1 月-2 月) に 2-3 機の PPB 実験を計画している. データはアルゴスを用いて取得するほか, 昭和基地及び南極半島の外国基地においてリアルタイム受信とデータレコーダー再生データの受信を行う. また, 春期間 (1991 年 9 月-11 月) にはスーパープレッシャー気球を用いてオゾン等の観測を行う.

9. 結 語

PPB 計画は 5 年間の工学的開発を経て, 実際に科学機器を搭載し本実験を実施する段階に至ろうとしている. PPB ワーキンググループメンバーをはじめ関係する諸研究者の方々の尽力に深く感謝するとともに, 今後計画をさらに煮詰める作業での協力を希望します.

文 献

- BARNETT, J. J. and CORNEY, M. (1985a): Middle atmosphere reference model derived from satellite data. *Handb. MAP*, **16**, 47-85.
- BARNETT, J. J. and CORNEY, M. (1985b): Planetary waves. *Handb. MAP*, **16**, 86-137.
- FUJII, M., KOMA, Y., OKABE, Y., OHTA, S., NISHIMURA, J. and HIROSAWA, H. (1983): Automatic control of balloon altitude. *Adv. Space Res.*, **3**, 53-56.
- 粕 豊 (1984): 気球システム II (オートバラスト, データレコーダ, 電源について). ポーラーパトロールバルーンの開発と利用技術—昭和59年度研究小集会プロシーディングス, 国立極地研究所編. 東京, 11-13.
- KOSHELOV, YU. P. (1985): Observed winds and temperatures in the southern hemisphere. *Handb. MAP*, **16**, 15-35.
- NAGATA, T., FUKUNISHI, H., NISHIMURA, J., KODAMA, M. and Co-MEMBERS OF PPB WORKING GROUP (1985): Polar Patrol Balloon Project in Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **38**, 156-163.
- 西村 純 (1988): 太陽中性子の観測. 極域周回気球 (ポーラーパトロールバルーン) の開発とそれを用いた研究—昭和62年度研究小集会プロシーディングス, 国立極地研究所編. 東京, 32-34.
- NISHIMURA, J., KODAMA, M., TSURUDA, K., FUKUNISHI, H. and Co-MEMBERS OF PPB WORKING GROUP (1985): Feasibility studies of "Polar Patrol Balloon". *Adv. Space Res.*, **5**, 87-90.
- 太田茂男 (1988): アルゴスシステム, オートバラストを用いた長距離飛翔 (B 1-35 気球の結果). 極域周回気球 (ポーラーパトロールバルーン) の開発とそれを用いた研究—昭和62年度研究小集会プロシーディングス, 国立極地研究所編. 東京, 5-7.
- 山上隆正 (1988): 宇宙ガンマ線バーストの観測. 極域周回気球 (ポーラーパトロールバルーン) の開

発とそれを用いた研究—昭和62年度研究小集会プロシーディングス，国立極地研究所編，東京，35-37.

YAMANAKA, M. D., YAMAZAKI, K. and KANZAWA, H. (1988): Studies of middle atmosphere dynamics under the Polar Patrol Balloon (PPB) Project: Present status and future plans. Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., 1, 65-74.

(1989年5月18日受付; 1989年5月22日改訂稿受理)